

**DE2442388**

**Patent number:** DE2442388  
**Publication date:** 1976-03-18  
**Inventor:** HOFFER OTTO DIPL ING  
**Applicant:** HOFFER OTTO DIPL ING  
**Classification:**  
- **international:** *H01F7/06; H01F7/06*; (IPC1-7): B60L13/00  
- **european:** H01F7/06  
**Application number:** DE19742442388 19740904  
**Priority number(s):** DE19742442388 19740904

**Also published as:**

CH573164 (A5)

**Report a data error here**

Abstract not available for DE2442388

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



⑪

# Offenlegungsschrift 24 42 388

⑫

Aktenzeichen: P 24 42 388.9

⑬

Anmeldetag: 4. 9. 74

⑭

Offenlegungstag: 18. 3. 76

⑳

Unionspriorität:

③② ③③ ③① —

⑤④

Bezeichnung: Kühlung der Magnetwicklungen der Tragsmagnete der Magnetschwebbahn durch die erzwungene Konvektion

⑦①

Anmelder: Hoffer, Otto, Dipl.-Ing., 8000 München

⑦②

Erfinder: gleich Anmelder

Dipl.Ing. Otto Hoffer

Kühlung der Magnetwicklungen der Tragmagnete der Magnetschwebbahn durch die erzwungene Konvektion

Die Erfindung betrifft eine Kühlung der Magnetwicklungen der Tragmagnete der Magnetschwebbahn durch die erzwungene Konvektion.

In den Wicklungen von Tragmagneten der Magnetschwebbahn wird, wie im jeden elektrischen Leiter, in dem elektrischer Strom fließt, elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Diesen Vorgang nennt man Dissipation.

Bei den Tragmagneten der Magnetschwebbahn ist die Stromstärke eine vorgegebene Größe. Durch den Stromfluß werden die Wicklungen der Tragmagnete so lange erwärmt, bis in ihnen die in der Zeiteinheit in Wärme umgewandelte elektrische Energie gleich der an das Kühlmedium übertragenen Wärmemenge ist. In diesem Falle haben die Wicklungen der Tragmagnete den stationären Betriebszustand erreicht. Man kann auch sagen, daß das thermische Gleichgewicht der Magnetwicklungen hergestellt ist.

Der stationäre Betriebszustand ist durch das Vorhandensein einer gleichbleibenden Temperatur der Wicklung  $T_w$  gekennzeichnet, die stets höher ist als die Temperatur der Umgebung  $T_o$ , wenn die Kühlung der Magnetwicklung durch die freie Konvektion erfolgt.

Es ist bekannt, daß bei der Kühlung der Magnetwicklungen durch die freie Konvektion geringe Wärmeübergangszahlen zu erwarten sind :

$$\alpha \leq 40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Bei den bisher gebauten Magnetschwebbahnen sind keine besonderen Vorrichtungen zur Kühlung der Magnetwicklungen bekannt geworden. Dies bedeutet, daß die Tragmagnete der bisher gebauten Magnetschwebbahnen durch die freie Konvektion gekühlt werden.

Bei der Weiterentwicklung der Magnetschwebbahn werden erfahrungsgemäß immer größere Tragfähigkeiten der Tragmagnete gefordert. Es wird deshalb eine immer bessere Kühlung der Magnetwicklungen erforderlich sein, wenn man das thermische Gleichgewicht der Magnetwicklungen aufrechterhalten will.

Es leuchtet ein, daß bei einer Steigerung der Belastung eines bestehenden Magneten die Kühlung seiner Magnetwicklung durch die freie Konvektion zur Aufrechterhaltung des thermischen Gleichgewichts der betrachteten Magnetwicklung bald nicht mehr ausreichen wird. Die betrachtete Magnetwicklung wird sich immer mehr erwärmen, bis sie schließlich zerstört ist.

Es liegt daher der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Kühlung der Magnetwicklungen der Tragmagnete durch die erzwungene Konvektion derart vorzugeben, daß eine Steigerung der Tragfähigkeit der Tragmagnete bei bestehenden Magnetschwebbahnen und die Entwicklung neuer Tragmagnete bei der Weiterentwicklung der Magnetschwebbahn möglich ist.

Wir nehmen an, daß die Magnetwicklungen aus einem dünnen und sehr breiten Aluminium-Band gewickelt sind. Diese Art von Wicklungen findet man fast ausschließlich bei Lasthebemagneten vor.

Es wird als Variante 1 der Lösung der der Erfindung zugrundegelegten Aufgabe vorgeschlagen, die Wicklung eines Tragmagneten an ihren Stirnflächen zu kühlen. Diese Art, die Wicklung zu kühlen kann man verwirklichen, indem man zwischen einer betrachteten Stirnfläche der Magnetwicklung und dem Gehäuse, in dem die Magnetwicklung untergebracht ist, einen Zwischenraum herstellt. Auf diese Weise sind an jeder Stirnfläche der Magnetwicklung je zwei Kühlkanäle hergestellt worden. Jeder Kühlkanal wird von der halben Stirnfläche der Wicklung, die wir nun Kühlfläche nennen wollen, von den freigegebenen Flächen am Gehäuse und von der freigewordenen Fläche am Magnetkern gebildet.

In den Kühlkanälen sind sehr große Wärmeübergangszahlen möglich. Wenn man z.B. als Kühlmedium Öl verwendet, so sind beliebig große Wärmeübergangszahlen möglich :

$$\alpha \leq 5000 \frac{W}{m^2 K}$$

Diese Tatsache bedeutet, daß im Wicklungsband eine eindimensionale Wärmeleitung erzwungen wird. Wir können also die Magnetwicklung sowie das Wicklungsband als einen eindimensionalen Wärmeleiter betrachten, der an seinen Rändern durch erzwungene Konvektion gekühlt wird.

Zwischen den einzelnen Windungen der Magnetwicklungen befindet sich eine elektrische Isolation. Da elektrische Isolatoren zugleich auch sehr schlechte Wärmeleiter sind, bedeutet die elektrische Isolation zwischen den Windungen auch eine thermische Isolation.

Auch durch das Vorhandensein einer thermischen Isolation zwischen den Windungen wird die eindimensionale Wärmeleitung im Wicklungsband gefördert.

Ein Ausschnitt aus dem abgewickelten und ausgestreckten Wicklungsband ist im Bild 1 veranschaulicht. Da das Wicklungsband an seinen beiden Oberflächen thermisch und elektrisch isoliert und andererseits an den Rändern gekühlt ist, ergibt sich in ihm eine eindimensionale Wärmeleitung. Die eindimensionale Wärmeleitung bedeutet, daß nur in Richtung der Erstreckung des Wicklungsbandes in die Breite ein Temperaturgradient vorhanden ist. Im Bild 1 ist der Wärmestrom mit  $Q$  bezeichnet. Die Richtung des Wärmestroms deuten die Pfeile an. Im Bild 1 ist ebenfalls ein Schnitt durch das Wicklungsband zu sehen. Die Erstreckung von der Bandmitte aus sei  $x$  genannt. Dann ist ein Volumenelement  $dV$  definiert als:

$$dV = l \cdot s \cdot dx \quad [m^3] \quad (1)$$

In der Gleichung (1) ist  $l$  die totale Bandlänge und  $s$  die Banddicke.

Das Differential der in der Wicklung in der Zeiteinheit in Wärme umgesetzten elektrischen Energie ist gleich der im Ele-

ment  $dV$  des Bandvolumens in der Zeiteinheit in Wärme umgesetzten elektrischen Energie. Die in der Zeiteinheit in Wärme umgesetzte elektrische Energie nennen wir auch Dissipation.

Es sei  $I$  die elektrische Stromdichte,  $\varrho$  der spezifische Widerstand des Bandmaterials,  $T$  die örtliche Temperatur des Bandes und  $T_e$  die Bezugstemperatur für die Berechnung des elektrischen Widerstands der Wicklung. Dann können wir das Differential der Dissipation folgendermaßen erhalten:

$$dQ = I^2 \varrho \cdot s \cdot dx \cdot [1 + \alpha_e (T - T_e)] \quad [W] \quad (2)$$

Im stationären Betriebszustand, also wenn die Wicklung im thermischen Gleichgewicht ist, ist eine infinitesimale Zunahme des Wärmestroms  $d\dot{Q}$  quer zum Volumenelement  $dV$  von der Breite  $dx$  gleich der Dissipation im betrachteten Volumenelement:

$$d\dot{Q} = dQ \quad (3)$$

Die infinitesimale Zunahme des Wärmestroms ist gegeben durch:

$$d\dot{Q} = -\lambda s \cdot I \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} \cdot dx \quad [W] \quad (4)$$

Wir können (2) und (4) einander gleichsetzen und erhalten dadurch die Differentialgleichung für die Temperaturverteilung im Wicklungsband in Abhängigkeit von der Entfernung von der Bandmitte  $x$ :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + I^2 \frac{\varrho}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot T - I^2 \frac{\varrho}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot T_e + I^2 \frac{\varrho}{\lambda} = 0 \quad (5)$$

Die Lösung der Differentialgleichung (5) ist die gesuchte Temperaturverteilung im Wicklungsband in Abhängigkeit von der Entfernung von der Bandmitte  $x$ :

$$T = T_{\infty} \cdot \cos\left(\sqrt{I^2 \frac{\varrho}{\lambda} \cdot \alpha_e} \cdot x\right) - \quad (6)$$

$$\left[\frac{1}{\alpha_e} - T_e\right] \cdot [1 - \cos(\sqrt{I^2 \frac{\varrho}{\lambda} \cdot \alpha_e} \cdot x)] \quad [K]$$

Im Bild 1 ist an den Leiterrändern (Bandrändern) eine mechanische Schutzschicht eingezeichnet worden. Diese Schutzschicht kann zum Schutz der Kühlfläche gegen mechanische Beschädigungen durch unkontrolliert in den Kühlstrom gelangte feste Partikel, wie grobe Staubkörner bei der Verwendung von Luft als Kühlmedium und Ähnliches, aufgetragen sein. Diese Schutzschicht kann einen Wärmewiderstand bedeuten und muß daher bei der Berechnung der maximalen Betriebstemperatur der Magnetwicklung, die in der Bandmitte auftritt, berücksichtigt werden.

Die Dicke der Schutzschicht sei  $B_1$  und ihre Wärmeleitzahl sei  $\lambda_1$ . Ferner sei  $T_2$  die Temperatur am Bandrand und  $T_1$  die Außentemperatur der Schutzschicht.  $T_0$  sei der Mittelwert der Temperatur des Kühlmediums. Dann muß am Bandrand die folgende Randbedingung erfüllt sein:

$$(T_2 - T_0) \cdot \frac{\frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \infty}{\frac{\lambda_1}{B_1} + \infty} = -\lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=\frac{B}{2}} \quad (7)$$

Der Ausdruck

$$k = \frac{\lambda_1 / B_1 \cdot \infty}{\lambda_1 / B_1 + \infty} \quad \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (8)$$

ist aber die wohlbekannte Definition des Wärmedurchgangskoeffizienten.

Es bereitet keine Schwierigkeiten, die Formeln für die maximale Betriebstemperatur der Magnetwicklung  $T_{\infty}$  und für die elektrische Leistung, die man für die Aufrechterhaltung der Tragkraft benötigt, und die im Folgenden entwickelt werden, auch für den Fall zu erweitern, daß an der Stirnfläche der Wicklung mehrere Schichten mit verschiedenen thermischen Eigenschaften aufgetragen sind.

Mit Hilfe der Gleichung (6) kann man den Differentialquotient  $\frac{dT}{dx}$  und die Temperatur am Bandrand  $T_2$  leicht berechnen:

$$T_2 = T_{\infty} \cdot \cos \left( \sqrt{1^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}} \right) - \left[ \frac{1}{\alpha_e} - T_e \right] \cdot [1 - \cos \left( \sqrt{1^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}} \right)] \quad [K] \quad (9)$$

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=\frac{B}{2}} = -T_{\infty} \cdot \sqrt{1^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot \sin \left( \sqrt{1^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}} \right)} - \left[ \frac{1}{\alpha_e} - T_e \right] \cdot \sqrt{1^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot \sin \left( \sqrt{1^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}} \right)}$$

$$\left[ \frac{K}{m} \right] \quad (10)$$



(9) und (10) eingesetzt in (7) ergeben die Bestimmungsgleichung für die maximale Temperatur  $T_{\infty}$  in der Bandmitte, die zugleich auch die Betriebstemperatur der Magnetwicklung im stationären Betriebszustand ist. Nach einigen elementaren Umformungen erhalten wir:

$$T_{\infty} = \frac{\lambda \cdot \left[ \frac{1}{\alpha_e} - T_e \right] \cdot \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \cdot \alpha_e \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}\right) + k \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{\alpha_e} - T_e \right] \cdot [1 - \cos\left(\sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}\right)] + T_0 \right\}}{k \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}\right) - \lambda \cdot \sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \cdot \alpha_e \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{2g}{\lambda}} \cdot \alpha_e \cdot \frac{B}{2}\right)}$$

[K] (11)

Ein Schnitt durch die vorgeschlagene Kühlung der Magnetwicklung ist im Bild 2 veranschaulicht. Die zugehörige Skizze des Gehäuses für die Magnetwicklung ist im Bild 3 veranschaulicht.

Die Gleichung (11) stellt die Temperatur in der Bandmitte und somit die Betriebstemperatur der Magnetwicklung im stationären Betriebszustand dar, wenn die Wärmeübergangszahl an den Kühlflächen sehr groß und daher die Änderung der Temperatur entlang des Kühlkanals verschwindend klein ist. Sie kann z.B. verwendet werden, wenn Öl als Kühlmedium verwendet wird.

Wenn Luft als Kühlmedium verwendet wird, so muß neben der Randbedingung (7) noch die folgende Zusatzbedingung eingeführt werden :

$$\frac{\lambda_1}{B_1} (T_2 - T_1) = \infty (T_1 - T_0) \quad (12)$$

Es sei entsprechend dem Bild 2  $H$  die Höhe der Magnetwicklung,  $h$  die Breite des Kühlkanals und  $L$  die Länge des Kühlkanals, die gleich der Länge der Magnetwicklung sei. Dann kann man nach [2] den Mittelwert der Temperatur des Kühlmediums wie folgt angeben:

$$T_0 = T_1 - (T_1 - T_{01}) \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{S_1 C_p \cdot h \cdot W}{\beta \cdot \infty} \left[ 1 - e^{-\frac{\beta \cdot \infty}{S_1 C_p \cdot h \cdot W} \cdot L} \right] \quad (13)$$

(9) und (13) eingesetzt in (12) ergeben die Bestimmungsgleichung für die Temperatur der Schutzschicht  $T_1$ . Nach einigen elementaren Umformungen erhalten wir die Außentemperatur der Schutzschicht  $T_1$  :

$$\frac{\lambda_1}{B_1} \cdot T_{\infty} \cdot \cos \left( \sqrt{1 \cdot \frac{2}{\lambda}} \alpha e \cdot \frac{B}{2} \right) - \frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \left[ \frac{1}{\alpha e} - T_e \right] \cdot [1 - \cos \left( \sqrt{1 \cdot \frac{2}{\lambda}} \alpha e \cdot \frac{B}{2} \right)] + T_0 \cdot \frac{\infty}{A} (1 - e^{-A})$$

[K] (14)

 $T_1 =$ 

$$\frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A}) + \frac{\lambda_1}{B_1}$$

L9

$$A = \frac{\beta \cdot \infty}{S_1 \cdot C_p \cdot h \cdot W} \cdot L$$

[1] (15)

Wir setzen (13) in (7) ein. In die so modifizierte Gleichung (7) setzen wir (9), (10) und (14) ein. Dadurch erhalten wir die Bestimmungsgleichung für die Betriebstemperatur  $T_{\infty}$  der Magnetwicklung. Nach einigen Umformungen erhalten wir die Betriebstemperatur  $T_{\infty}$  der Magnetwicklung:

$$\begin{aligned}
 & \lambda \cdot \left[ \frac{1}{\alpha e} - T_e \right] \cdot \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \sin \left( \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \right) + k \cdot \left[ \frac{1}{\alpha e} - T_e \right] \cdot [1 - \cos \left( \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \right)] + \\
 & \frac{\alpha}{A} \cdot (1 - e^{-A}) \cdot \left[ 1 - \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-A}) \right] \cdot \frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-A}) \right] \cdot \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\alpha e} - T_e \right] + \\
 & + k \cdot \frac{\alpha}{A} \cdot (1 - e^{-A}) \cdot \frac{\lambda_1}{B_1} \cdot T_{01} - k \cdot \frac{\alpha}{A} \cdot (1 - e^{-A}) \cdot \frac{\lambda_1}{B_1} \cdot [1 - \cos \left( \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \right)] \cdot \left[ \frac{1}{\alpha e} - T_e \right] + \\
 & + k \cdot \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-A}) \cdot T_{01} \\
 T_{\infty} = & \frac{k \cdot \cos \left( \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \right) - k \cdot \frac{[1 - \frac{1}{A} \cdot (1 - e^{-A})]}{\frac{\alpha}{A} \cdot (1 - e^{-A}) + \frac{\lambda_1}{B_1}} \cdot \frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \cos \left( \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \right) -}{\lambda \cdot \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \sin \left( \sqrt{I^2 \cdot \frac{g}{\lambda} \cdot \alpha e} \cdot \frac{B}{2} \right)} \\
 & [K] \quad (16)
 \end{aligned}$$

Es wurde bei der Ableitung der Gl. (16) angenommen, daß, entsprechend dem Wärmeübertragungsmodell im Bild 1, zwischen dem elektrisch leitenden Teil des Wicklungsbands und dem Kühlmedium eine Schutzschicht von der Dicke  $B_1$  vorhanden ist. In Wirklichkeit ist die elektrische Isolation rund um das Band aufgetragen, da sie durch Eloxieren hergestellt wird. Daher sind zwischen dem elektrisch leitenden Teil des Wicklungsbands und dem Kühlmedium zwei Schichten vorhanden, die elektrische Isolation des leitenden Teils des Wicklungsbands und die noch zusätzlich auf der Kühlfläche aufgetragene mechanische Schutzschicht. Der Einfluß der elektrischen Isolation wird, da sie sehr dünn ist:

$$\delta \leq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

verschwindend klein sein.

Die Gl. (16) stellt daher die allgemein gültige Gleichung für die Betriebstemperatur der Magnetwicklung im stationären Betriebszustand dar.

Wir müssen noch die elektrische Leistung der Magnetwicklung berechnen. Im stationären Betriebszustand ist die elektrische Leistung der Magnetwicklung gleich der in ihr in der Zeiteinheit in Wärme umgewandelten elektrischen Energie. Daher ist die elektrische Leistung der Magnetwicklung definiert als:

$$\dot{Q} = -2 \cdot l \cdot s \cdot \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=\frac{B}{2}} \quad [\text{W}] \quad (17)$$

Hierbei ist  $\left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=\frac{B}{2}}$  durch die Gl. (10) definiert.

Es sei  $T_{02}$  die Temperatur des Kühlmediums am Austritt aus dem Kühlkanal. Dann kann man nach [2]  $T_{02}$  wie folgt angeben:

$$T_{02} = T_1 - (T_1 - T_{01}) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot \beta}{g_1 \cdot C_p \cdot h \cdot W} \cdot L} \quad [\text{K}] \quad (18)$$

Als Variante 2 der Lösung der der Erfindung zugrundegelegten Aufgabe wird die im Bild 5 veranschaulichte Kühlung vorgeschlagen. Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß in einem entsprechenden Gehäuse zwei Wicklungen untergebracht sind. Zwischen den Wicklungen ist entsprechend dem Bild 5 ein Abstand  $h$  vorhanden. Dadurch erhält man zwei Kühlkanäle, in denen das Kühlmedium strömt und die beiden Wicklungen kühlt.

Theoretisch gibt es zwischen den beiden Kühlungsvarianten keinen Unterschied, wenn man beachtet, daß die Breite des Wicklungsbands bei der Kühlungsvariante 2 der halben Breite des Wicklungsbands bei der Kühlungsvariante 1 entspricht.

Einen Unterschied zwischen den beiden Kühlungsvarianten gibt es insofern als bei der Kühlungsvariante 2 ein Kühlstrom und bei der Kühlungsvariante 1 zwei Kühlströme vorhanden sind. Daher wird die Erwärmung des Kühlmediums und daher auch die Betriebstemperatur  $T_{00}$  der Wicklungen bei der Kühlungsvariante 2 größer sein als bei der Kühlungsvariante 1.

Den Unterschied zwischen der Kühlungsvariante 1 und der Kühlungsvariante 2 stellt der Faktor  $\beta$  in den Gleichungen (13), (15) und (18) her. Es sei  $\gamma$  der Füllfaktor der Wicklung. Dann ist für die Kühlungsvariante 1:

$$\beta = \gamma \quad [1] \quad (19)$$

Und für die Kühlungsvariante 2:

$$\beta = 2 \cdot \gamma \quad [1] \quad (20)$$

Der Füllfaktor ist gegeben durch:

$$\gamma = \frac{n \cdot S}{H} \quad [1] \quad (21)$$

In der Gleichung (21) ist  $n$  die Anzahl der Windungen. Die beiden Wicklungen bei der Kühlungsvariante 2 müssen vollkommen identisch gebaut sein.

Die Gleichung (16) können wir noch vereinfachen, indem wir in ihr noch einige elementaren Umformungen vornehmen. Dadurch erhalten wir:

$$T_{\infty} = \frac{\frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \frac{\frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A})}{\frac{\lambda_1}{B_1} + \frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A})} \cdot \left[ \frac{1}{\infty e} - T_e \right] \cdot \left[ 1 - \cos \left( \sqrt{1 \cdot \frac{2g}{\lambda}} \cdot \infty e \cdot \frac{B}{2} \right) \right] + \frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \frac{\frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A})}{\frac{\lambda_1}{B_1} + \frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A})} \cdot T_{01} + \lambda \cdot \sqrt{1 \cdot \frac{2g}{\lambda}} \cdot \infty e \cdot \left[ \frac{1}{\infty e} - T_e \right] \cdot \sin \left( \sqrt{1 \cdot \frac{2g}{\lambda}} \cdot \infty e \cdot \frac{B}{2} \right)}{\frac{\lambda_1}{B_1} \cdot \frac{\frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A})}{\frac{\lambda_1}{B_1} + \frac{\infty}{A} \cdot (1 - e^{-A})} \cdot \cos \left( \sqrt{1 \cdot \frac{2g}{\lambda}} \cdot \infty e \cdot \frac{B}{2} \right) - \lambda \cdot \sqrt{1 \cdot \frac{2g}{\lambda}} \cdot \infty e \cdot \sin \left( \sqrt{1 \cdot \frac{2g}{\lambda}} \cdot \infty e \cdot \frac{B}{2} \right)}$$

[K] (22)

In [3] ist an einem Testmagnet die Gültigkeit der Theorie der Kühlung der Magnetwicklungen durch die erzwungene Konvektion geprüft und sehr gut bestätigt worden. Die Kühlung der Magnetwicklung erfolgte entsprechend der Kühlungsvariante 1. Die Daten der Magnetwicklung sind in der Tabelle 1 aufgetragen.

Mit diesen Daten wurde die Betriebstemperatur der Magnetwicklung des Testmagneten wie folgt berechnet:

$$T_{\infty} = 476 \text{ K}$$

Es wurde andererseits gemessen :

$$T_{\infty} = 464 \text{ K}$$

Wie man sieht stimmen die Theorie und das Experiment ausgezeichnet überein.



## Formelzeichen

B	Breite des Wicklungsbands	[m]
B <sub>1</sub>	Breite der mechanischen Schutzschicht zwischen dem Wicklungsband und dem Kühlmedium	[m]
C <sub>p</sub>	Spez. Wärme des Kühlmediums	$[\frac{\text{W} \cdot \text{sek}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}]$
H	Höhe der Wicklung	[m]
h	Breite des Kühlkanals	[m]
I	elektrische Stromdichte	$[\frac{\text{A}}{\text{m}^2}]$
J	Stromstärke	[A]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}]$
l	totale Bandlänge	[m]
L	Länge der Wicklung	[m]
s	effektive Bandstärke	[m]
T <sub>0</sub>	Mittelwert der Temperatur des Kühlme- diums	[K]
T <sub>01</sub>	Temperatur des Kühlmediums am Eintritt in den Kühlkanal	[K]
T <sub>02</sub>	Temperatur des Kühlmediums am Austritt aus dem Kühlkanal	[K]
T <sub>e</sub>	Bezugstemperatur für die Berechnung des elektrischen Widerstands der Magnetwicklung	[K]
λ	Wärmeleitzahl des Wicklungsbands	[W/m·K]

$T_1$	Temperatur der mechanischen Schutzschicht außen	[K]
$T_2$	Temperatur des Wicklungsbands am gekühlten Bandrand	[K]
$T_{\infty}$	Temperatur des Wicklungsbands in der Bandmitte (Betriebstemperatur der Magnetwicklung im stationären Betriebszustand)	[K]
$\dot{Q}$	Dissipation (elektr. Leistung der Magnetwicklung)	[K]
$V$	Volumen des Wicklungsbands	[m <sup>3</sup> ]
$W$	Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit im Kühlkanal	[ $\frac{m}{sek}$ ]
$\alpha$	Wärmeübergangszahl	[ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]
$\beta$	Faktor zur Unterscheidung zwischen den Kühlungsvarianten	[1]
$\gamma$	Füllfaktor	[1]
$\delta_1$	Dicke der elektrischen Isolation auf dem Wicklungsband	[m]
$\varrho_1$	Dichte des Kühlmediums	[ $\frac{Kg}{m^3}$ ]
$\varrho$	spezifischer elektrischer Widerstand des Wicklungsbandmaterials	[ $\frac{\Omega \cdot m^2}{m}$ ]
$\alpha_e$	Temperaturkonstante des elektrischen Widerstands des Bandmaterials	[ $\frac{1}{K}$ ]
$n$	Anzahl der Windungen der Magnetwicklung	[1]
$\lambda_1$	Wärmeleitzahl der mechanischen Schutzschicht	[W/m·K]

## Schrifttum

- [1] Doetsch, Gustav :Anleitung zum praktischen Gebrauch  
der Laplace-Transformation und der  
Z-Transformation  
R. Oldenbourg Verlag, München-Wien 1967
- [2] Hoffer, Otto :Berechnung der elektrischen Leistung  
und der Betriebstemperatur von Trag-  
magneten für ein THTS.System-Studien  
der Krauss-Maffei AG.Erstellt im Auf-  
trag des Bundesministeriums für For-  
schung und Technologie.
- [3] Hoffer, Otto :Magnettest.System-Studien der Krauss-  
Maffei AG.Erstellt im Auftrag des  
Bundesministeriums für Forschung und  
Technologie.

## Patentansprüche

1. Kühlung der Magnetwicklung eines Tragsmagneten für die Magnetschwebbahn, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen einer zu kühlenden Stirnfläche der Magnetwicklung und der gegenüberliegenden Gehäusewand des Gehäuses, in dem die Magnetwicklung untergebracht ist, ein Abstand vorhanden ist, so daß sich dadurch pro zu kühlende Stirnfläche der Magnetwicklung zwei rechteckige Kühlkanäle ergeben, in denen das Kühlmedium strömt und die Magnetwicklung thermisch im Gleichgewicht hält.
2. Kühlung der Magnetwicklung eines Tragsmagneten für die Magnetschwebbahn, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetwicklung aus zwei Teilwicklungen besteht, die im Gehäuse für die Magnetwicklung in einem Abstand voneinander so untergebracht sind, daß sich dadurch zwei Kühlkanäle zwischen den zu kühlenden Teilwicklungen ergeben, in denen das Kühlmedium entlang der zu kühlenden Stirnflächen strömt und die beiden Teilwicklungen thermisch im Gleichgewicht hält.
3. Kühlung der Magnetwicklung eines Tragsmagneten für die Magnetschwebbahn nach Anspruch 1 oder nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die zu kühlenden Stirnflächen der Magnetwicklung bei der Kühlung nach Anspruch 1 und die zu kühlenden Stirnflächen der Teilwicklungen bei der Kühlung nach Anspruch 2 kleine Kugeln, Kalotten oder Kegel, deren Höhe klein im Vergleich zur Höhe der Kühlkanäle ist, aufweisen und die eine Steigerung der Turbulenz des Kühlstroms zur Aufgabe haben, so daß sich dadurch eine Steigerung der Wärmeübergangszahl ergibt.

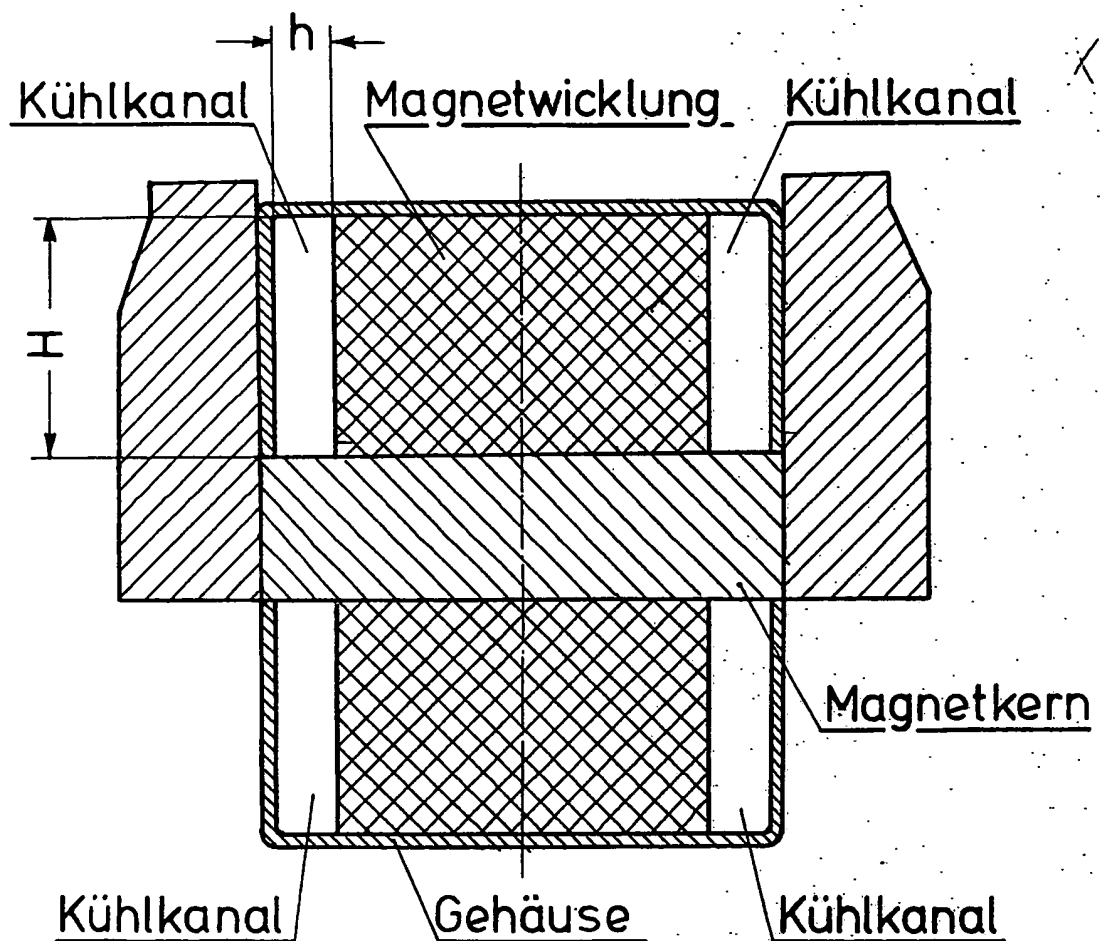


BILD 2. KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNG DURCH  
DIE ERZWUNGENE KONVEKTION  
VARIANTE 1 DER KÜHLUNG

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION

609812/0149

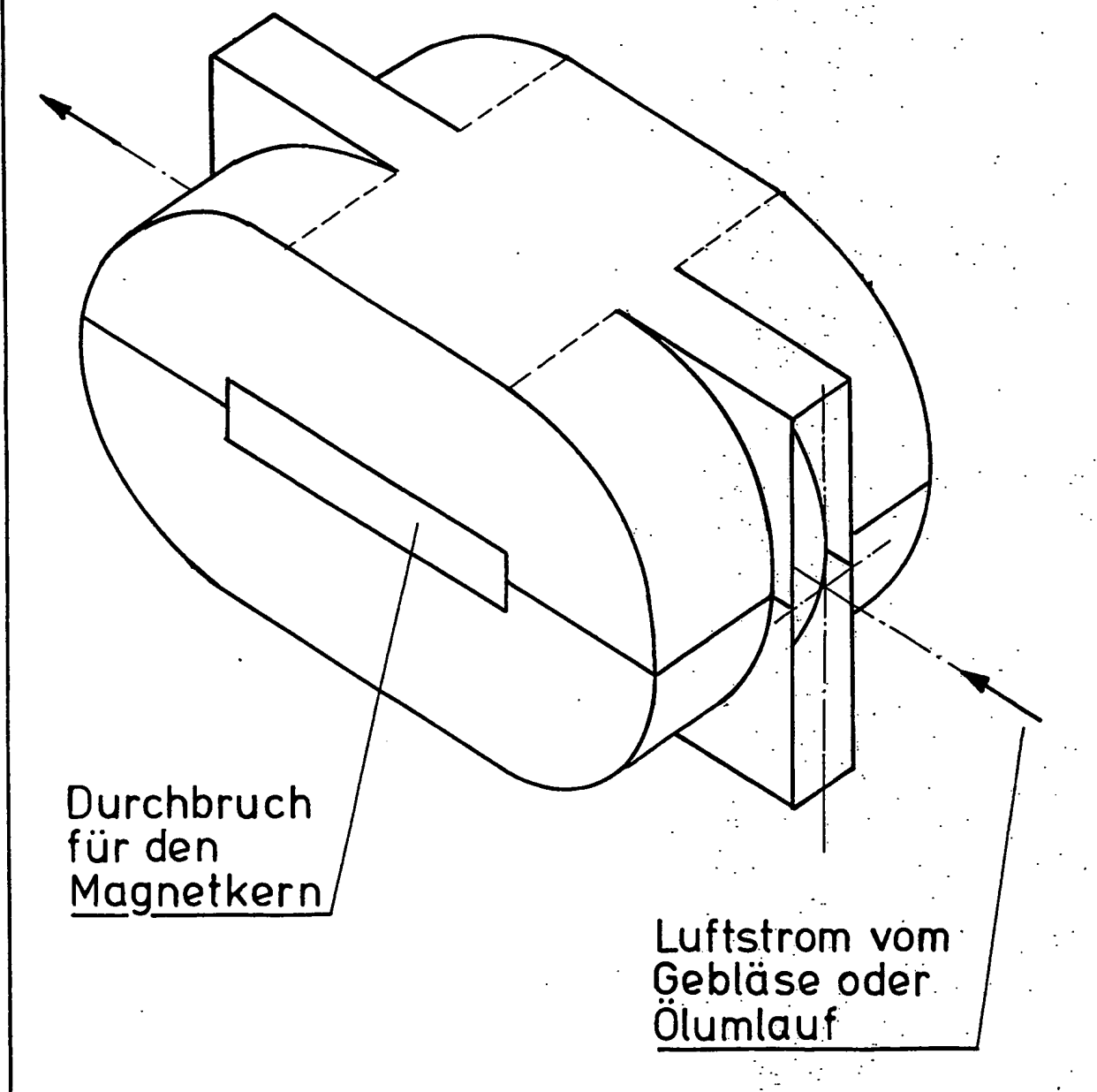


BILD 6 . KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNG DURCH  
DIE ERZWUNGENE KONVEKTION  
VARIANTE 2 DER KÜHLUNG, GEHÄUSESKIZZE

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION

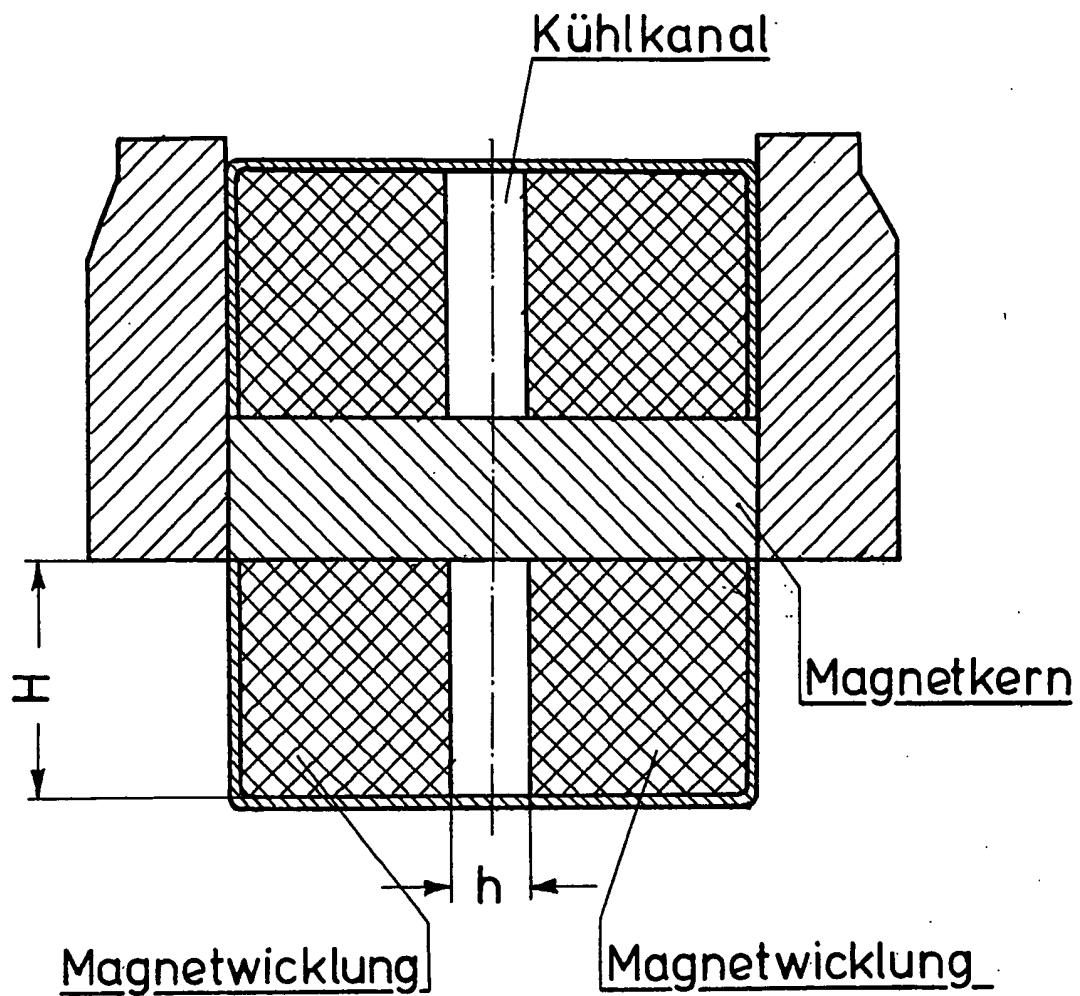


BILD 5. KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNG DURCH  
DIE ERZWUNGENE KONVEKTION  
VARIANTE 2 DER KÜHLUNG

609812/0149

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION

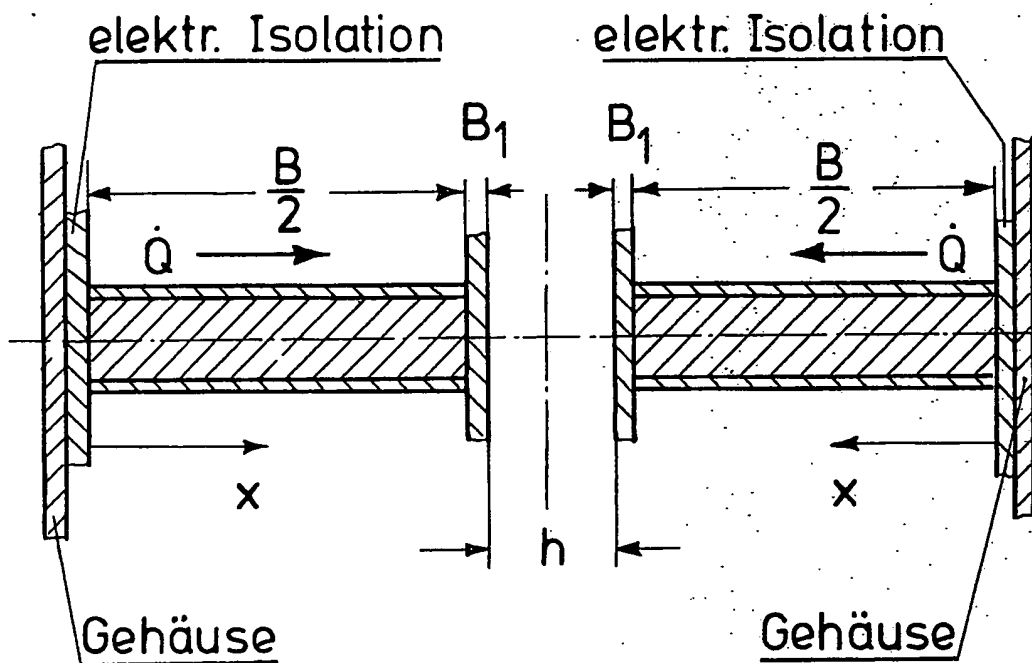


BILD 4. ZUR GEOMETRIE DES WICKLUNGSBANDS UND WÄRMEÜBERTRAGUNGSMODELL  
VARIANTE 2 DER KÜHLUNG

609812/0149

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION



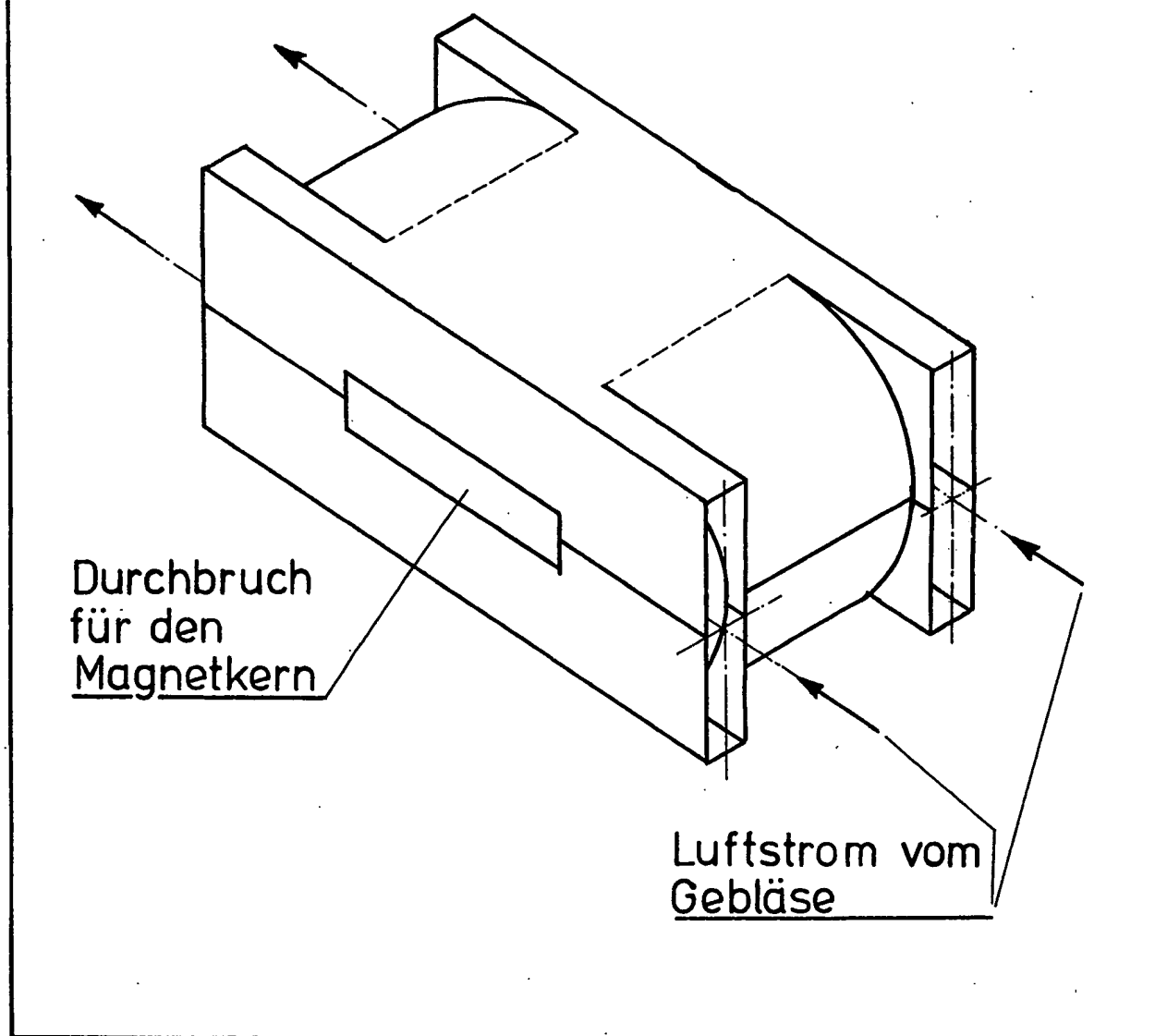
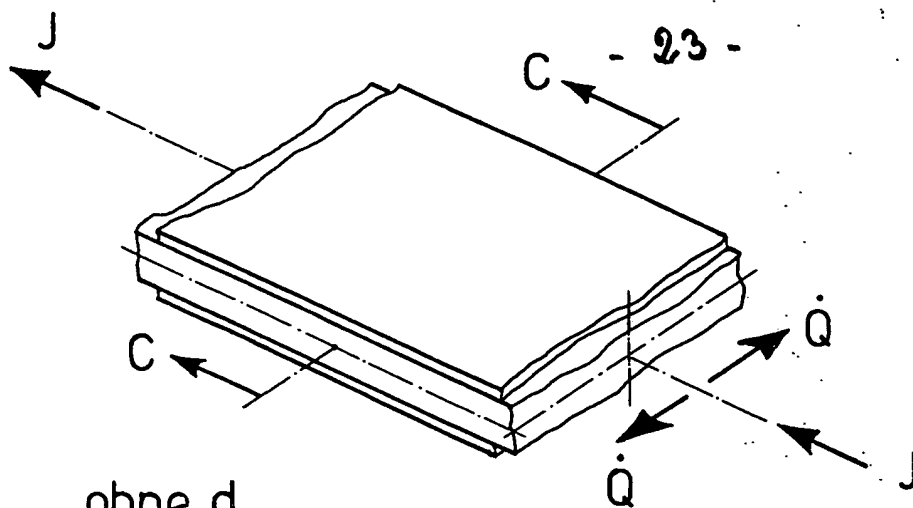
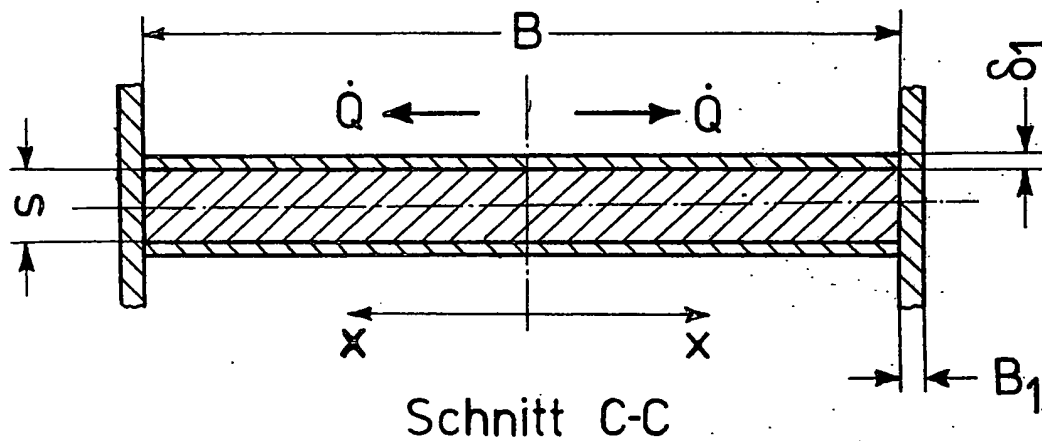


BILD 3. KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNG DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION  
VARIANTE 1 DER KÜHLUNG, GEHÄUSESKIZZE

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION



ohne d.  
Schutzschicht  $B_1$   
gez.



Schnitt C-C

nicht maßstabgerecht gez.

BILD 1. ZUR GEOMETRIE DES WICKLUNGSBANDS UND  
WÄRMEÜBERTRAGUNGSMODELL  
VARIANTE 1 DER KÜHLUNG

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION

B =	0,120	m
B <sub>1</sub> =	0,000325	m
J =	48	A
I =	2960000	A/m <sup>2</sup>
H =	0,074	m
h =	0,025	m
C <sub>p</sub> =	1000	W·sek/Kg·K
L =	0,43	m
α =	215	W/m <sup>2</sup> ·K
α <sub>e</sub> =	0,00430	1/K
λ =	200	W/m·K
λ <sub>1</sub> =	0,2	W/m·K
s =	0,000135	m
g =	0,000000029	Ω·m <sup>2</sup> /m (T <sub>e</sub> = 293 K)
g <sub>1</sub> =	1,2	Kg/m <sup>3</sup>
W =	26	m/sek
β =	1	
γ =	0,84	
T <sub>01</sub> =	293	K

TABELLE 1. DATEN FÜR DEN TESTMAGNET

KÜHLUNG DER MAGNETWICKLUNGEN DER TRAGMAGNETE DER  
MAGNETSCHWEBEBAHN DURCH DIE ERZWUNGENE KONVEKTION